

文章编号: 1001-1455(2004)04-0319-05

一种特殊平面装药爆轰波阵面的摄影与结果分析*

吕洪生^{1, 2}, 王志兵²

(1. 长沙大学应用物理与电子技术系, 湖南 长沙 410003;

2. 国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 对由导爆索构成的平面装药的爆轰波阵面进行了高速摄影, 并将其摄影照片同理论作图做了对比, 结果表明此理论作图的方法是正确的。

关键词: 爆炸力学; 作图分析; 高速摄影; 变形爆轰波阵面; 特殊平面炸药装药

中图分类号: O381 国标学科代码: 130°3510 文献标志码: A

1 引言

为了研究平铺导爆索的爆轰波阵面形状与传播发展规律, 并检验描述平铺导爆索爆轰波阵面理论^[1]的正确性, 对平铺导爆索的爆轰做了高速摄影, 并对摄影照片做了分析, 同时把摄影照片与按文献[1]中作图法所作的图像进行了对比。结果表明, 波阵面形状及描述它的传播与发展的理论是正确的。

2 爆轰的高速摄影与结果分析

2.1 拍照波形

将长 50cm 的导爆索一根紧挨一根地平直铺在木板上, 构成约 50cm × 40cm 的各向异性装药平面, 见图 1。起爆点在板的中心(坐标原点处), 为了使雷管足以引爆导爆索, 在中心处先平铺一层厚 1 ~ 2mm、直径约 2cm 的散装黑索今(RDX)以填平导爆索间的沟槽(图 1 中大圆所示), 再在这平铺药粉之上放置一直径约 1cm 的小圆管(图 1 中小圆所示), 管内装上厚 7 ~ 8mm、压得较实的 RDX 药粉, 高压雷管立放管中。

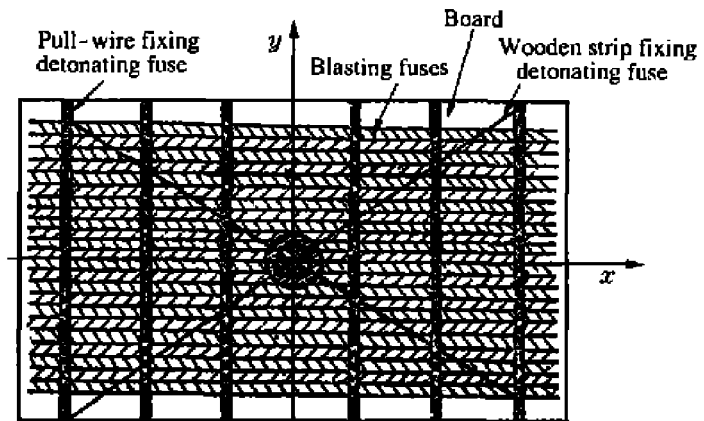


图 1 由导爆索构成的平面装药

Fig. 1 Plane charge composed of detonating fuses

装药爆轰时, 高速像机垂直地对准药板的中心。高速摄影的照片列在图 2 中,

分幅照片的时间间隔为 4 μ s, 照片中靠边缘附近的竖向黑条影为木板条遮影。其头两张照片中的斜向交叉线为固定雷管拉线影像。照片图像的外边界则为爆轰波阵面, 它是菱形的变形——纺锤形。

照片 No. 1 为爆炸初期, 爆轰尚未稳定; No. 2 因压固板条和固定拉线遮掩严重, 故爆轰影像不清楚; No. 5 和 No. 7 横向尖角变秃, 是因爆轰区域的图像被固压板条所档盖; No. 9 因沿横向(图 1 的 x 向)的爆轰扰动已达装药边界, 故两边的夹角开始变秃, 同时该角向上偏, 这是因装药时端部的导爆索未拉直微向上弯曲之故; No. 10 同 No. 9 的情况; No. 11 为爆轰扰动沿 x 轴和 y 轴均早已达到装药的边

* 收稿日期: 2003-09-16; 修回日期: 2004-04-02

作者简介: 吕洪生(1939—), 男, 教授。

界,但整个爆轰尚未结束;No.12 情况同 No.11;No.13 为爆轰已经结束。

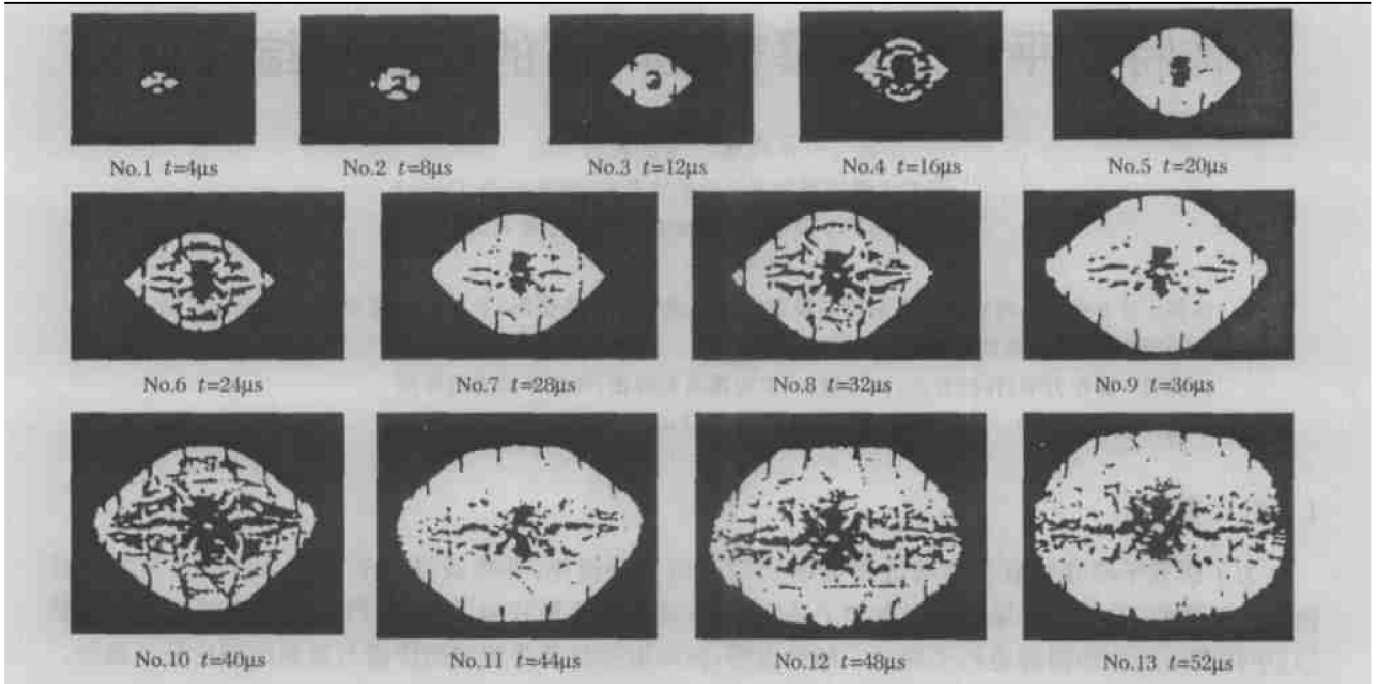


图 2 爆轰进程中各不同时刻的摄影照片

Fig.2 Photographed pictures at different moments in detonation process

2.2 结果分析

从图 2 中各照片看出以下特点:

(1)除 No.1 ~2、No.10 ~13 外,各图像在横向(沿导爆索方向)是锐角,这些夹角几乎相同。

(2)除 No.1 ~2、No.13 外,各图像边缘的直线部分随时间增长;其直线部分的延长线构成几乎相似的菱形,这些菱形横向夹角之半的平均值

$$\beta \approx 40^\circ \tag{1}$$

(3)除 No.1 ~2、No.11 ~13 外,各图像的边缘在垂直方向(垂直导爆索方向)呈圆弧状。

以上这些特点恰恰符合文献[1]中所指出的:平辅导爆索爆轰波阵面的形状特征。

3 同理论作图对比

3.1 作图需要的数据

(1)对于本实验的装药,已测得沿导爆索方向(x 向)和垂直爆索方向(y 向)的爆轰扰动速度分别为

$$D_1 \approx 7.1\text{km/s}, \quad D_2 \approx 4.9\text{km/s} \tag{2}$$

(2)为了同理论作图比较,并研究爆轰波阵面的增长比和求得作图的放大系数,将图 2 中的几张典型照片:No.3、No.6、No.8、No.10 再放大(放大的照片在此从略),它们的边缘轮廓分别刻画在图 3 中。

这些边界线在 x 轴上的跨度 a_n 和在 y 轴上的跨度 b_n 分别为(注意:以下的数据是作者当初所用放大照片的数据,而图 3 是这些照片按一定比例的缩影)

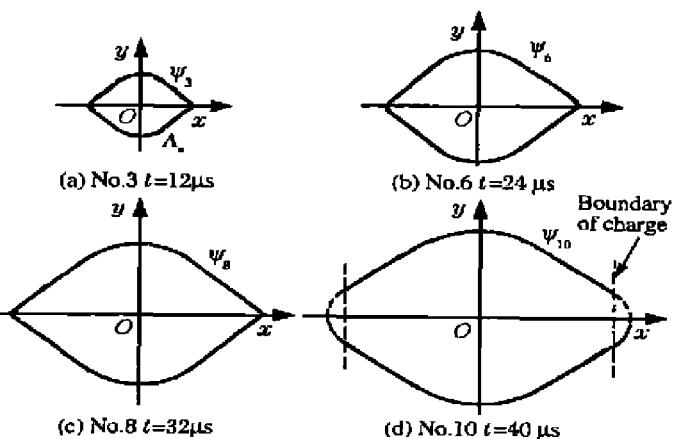


图 3 几张典型照片的图像轮廓线(即爆轰波阵面)

Fig.3 Fringe outlines (i.e. detonation fronts) of images of the several typical pictures

$$\begin{cases} a_3 = 28\text{mm} \\ b_3 = 19\text{mm} \end{cases}, \begin{cases} a_6 = 50\text{mm} \\ b_6 = 33\text{mm} \end{cases}, \begin{cases} a_8 = 64\text{mm} \\ b_8 = 45\text{mm} \end{cases}, \begin{cases} a_{10} = 75\text{mm} \\ b_{10} = 56\text{mm} \end{cases} \quad (3)$$

由上式可以求得爆轰扰动沿 y 轴传播与沿 x 轴传播的增长比

$$\eta = \frac{1}{2} \left[\frac{b_6 - b_3}{a_6 - a_3} + \frac{b_8 - b_3}{a_8 - a_3} \right] = 0.7189 \quad (4)$$

由(3)式和(4)式, 可见

$$\eta \approx D_2/D_1 \quad (5)$$

这正符合文献[1]所预示的结果。

注意, (3)式所给的数据当然并非实验爆轰的传播距离, 而是实际尺寸乘以放大系数 K 。因 y 向尺度易测量且较全, 故由 y 向尺寸来确定放大系数 K 。爆轰沿 y 向在任一时刻 t 的跨度 b 满足

$$b = K(2D_2t + b_0) \quad (6)$$

式中: b_0 为初始跨度。将 D_2 值以及(3)式中的 b_n 值代入上式, 并将求得的诸 K 值和 b_0 值取算术平均, 则求得

$$\begin{cases} K = 0.137 \\ b_0 = 12.6\text{mm} \end{cases} \quad (7)$$

3.2 理论作图

现以 No.3 图像的边界线 Λ_* (即图 3(a)) 作为爆轰波阵面的初始波形 (关于图 3(a) 亦可按理论作图, 见附录 A), 即

$$\begin{cases} a_3 = 28\text{mm} \\ b_3 = 19\text{mm} \end{cases} \quad t_3 = 12\mu\text{s} \quad (8)$$

利用(7)式和(8)式及(2)式的数据, 便可求作出 $t_6 = 24\mu\text{s}$ 、 $t_8 = 32\mu\text{s}$ 、 $t_{10} = 40\mu\text{s}$ 时刻的爆轰波阵面。

(1) 按文献[1]中的情况 B 作图法, 对平铺导爆索点起爆的波阵面作图

作图的结果见图 4, 其中图线 Λ_6 、 Λ_8 、 Λ_{10} 分别对应 t_6 、 t_8 、 t_{10} 时刻, 而图中

$$\alpha = \arctan(D_2/D_1) = 35^\circ \quad (9)$$

图中 Q^* 、 S^* 、 T^* 、 W^* 分别为曲线斜率取值为 $\pm D_2/D_1 = \pm \tan \alpha$ 时的对应点; 而 $\overline{A^*A} = \overline{Q^*Q} = \overline{S^*S_1} = \overline{B^*B} = \overline{T^*T} = \overline{W^*W_1} = 2KD_1(t_{10} - t_3)$; $\overline{Q^*Q_1} = \overline{S^*S} = \overline{T^*T_1} = \overline{W^*W} = 2KD_2(t_{10} - t_3)$; 弧线 $\overline{Q^*S^*} \equiv \overline{Q_1S}$, $\overline{T^*W^*} \equiv \overline{T_1W}$, $\overline{W^*A^*Q^*} \equiv \overline{W_1AQ}$, $\overline{S^*B^*T^*} \equiv \overline{S_1BT}$; $\overline{QQ_1} = \overline{SS_1} = \overline{TT_1} = \overline{WW_1}$; Λ_6 、 Λ_8 、 Λ_{10} 分别对应于图 3(b)、(c)、(d)。

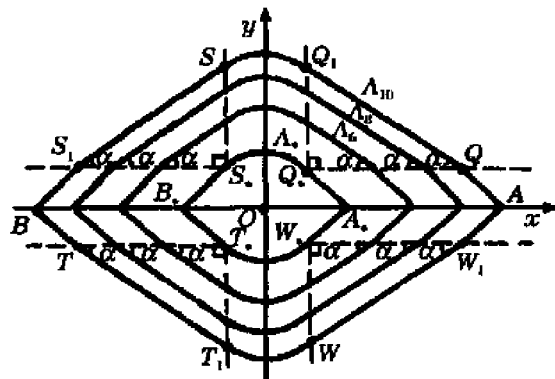


图 4 按文献[1]中情况 B 的作图法绘制的不同时刻的爆轰波阵面
Fig.4 Detonation fronts drawn according to the diagraphy for the circumstance B in the ref.[1] at different moments

本实验所用的导爆索当然是非理想情况, 尤其是包皮较薄, 故在某种程度上, 这种装药又可看成“理想的平铺导爆索加一层各向同性的炸药”, 于是又可按下述方法作图。

(2) 按文献[1]中的情况 D 作图法, 对平铺导爆索点起爆的波阵面作图

作图结果见图 5, 图线 Ω_6 、 Ω_8 、 Ω_{10} 分别对应 t_6 、 t_8 、 t_{10} 时刻, 其中

$$\theta = \arctan \left[\frac{D_0}{\sqrt{D_1^2 - D_0^2}} \right] = 44^\circ \quad (10)$$

式中: $D_0 = D_2 = 4.9\text{km/s}$ 。

图中 Q^* 为曲线 Λ_* 上其斜率取 $\pm \tan \theta$ 时的外接线的接点; T^* 为斜率为 $\tan \theta$ 的切线的切点; S^* 为斜率为 $\tan \theta$ 的外接线的接点; $\overline{E^*E} = \overline{S^*S} = \overline{T^*T_1} = \overline{F^*F} = \overline{Q^*Q_2} = \overline{Q^*Q_1} = 2KD_2(t_{10} - t_3)$;

$\overline{S * T *} = \overline{S_1 T}$; $\overline{QQ_1} = \overline{SS_1} = \overline{TT_1} = \overline{Q_2 Q}$ 为直线段; 而弧线 $\overline{Q_1 E S}$ 为 $\overline{Q * E * S *}$ 的相似放大, $\overline{T_1 F Q_2}$ 为 $\overline{T * F * Q *}$ 的相似放大; 其他一些线段和弧线的关系同理。 Ω_6 、 Ω_8 、 Ω_{10} 分别对应于图 3(b)、(c)、(d)。

3.3 理论作图与实际波形对比

为了检验理论作图法的正确性, 将各个时刻的两种理论作图(见图 4 和图 5)同其相应时刻的实际爆轰波阵面排列在一起, 见图 6(a)、(b)、(c), 图中曲线 Λ 、 Ψ 、 Ω 分别取自图 4、图 3、图 5 中对应曲线。

比较各个时刻的波形看出, 两种理论作图与实际的爆轰波阵面的形状很符合, 只是前一理论作图 Λ_n 比实际的图像 Ψ_n “瘦些”; 而后一理论作图 Ω_n 比 Ψ_n “胖些”。正如理论所料, 实际的波形图 Ψ_n 正好介于 Λ_n 和 Ω_n 之间, 例如实际爆轰波阵面的直线部分的夹角 β (见(1)式)正好约等于两种理论作图的夹角 α (见(9)式)和 θ (见(10)式)之和的一半, 即有

$$\beta \approx (\alpha + \theta) / 2 \tag{11}$$

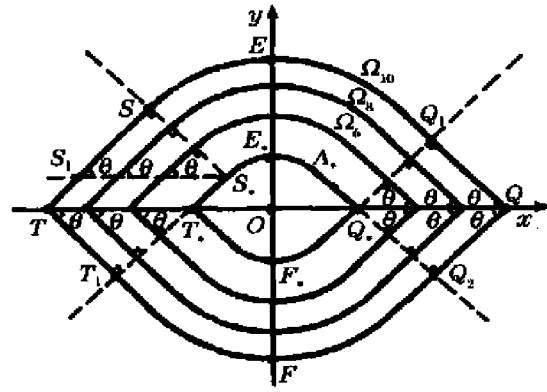


图 5 按文献[1]中情况 D 的作图法绘制的不同时刻的爆轰波阵面

Fig.5 Detonation fronts drawn according to the diagraphy for the circumstance D in the ref.[1] at different moments

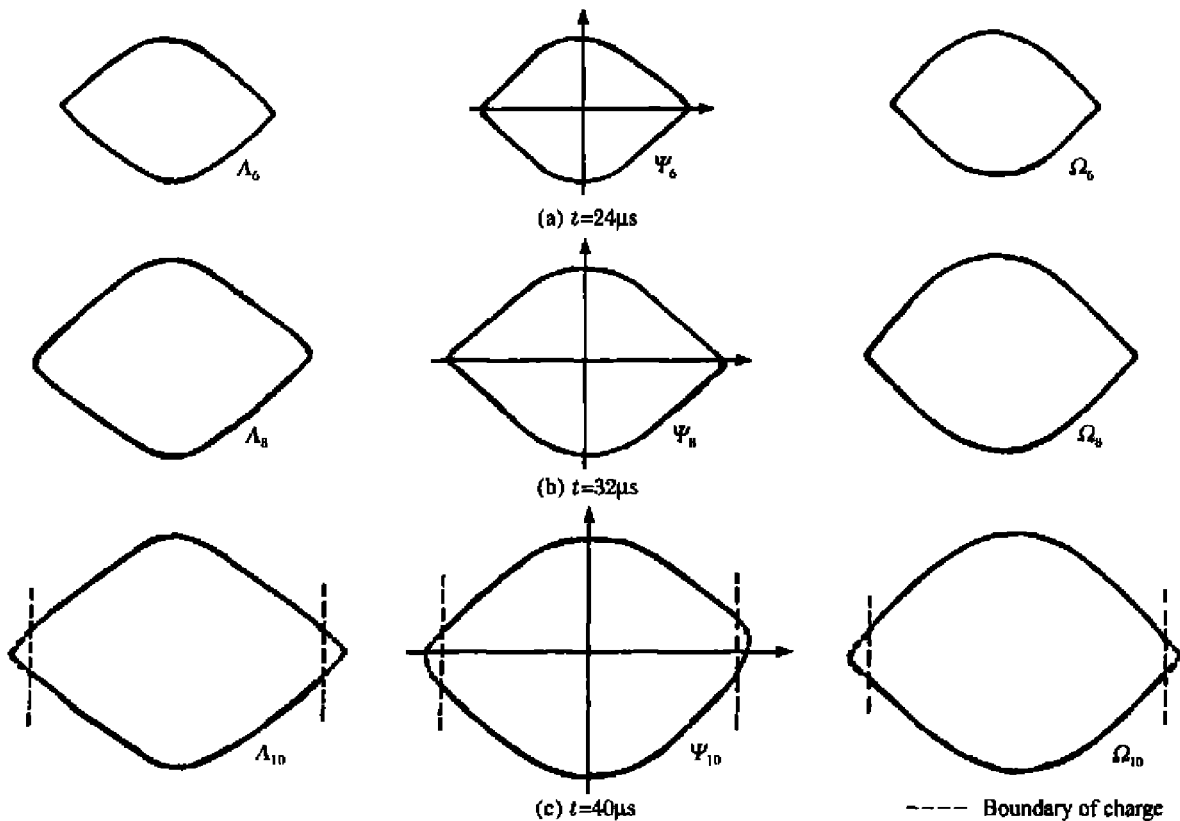


图 6 实际爆轰波阵面与理论爆轰波阵面对比

Fig.6 The real detonation front compared with the theoretical detonation front

4 结 语

通过对平铺导爆索点起爆的爆轰波阵面的实地拍照与理论作图, 获得如下两点收益: (1) 获得了平铺导爆索爆轰波阵面的形状, 这对于研究平铺导爆索的爆轰性质、以及研究卷在圆柱或圆管上(如爆压

导线)的导爆索的爆轰波非常有用。(2)证明了文献[1]关于平铺导爆索等各向异性装药的爆轰波阵面的形状及作图的理论正确并实用。

当然,理论与实际还有一定的差距,这来源于实际装药的非理想性和对波形的测量误差,例如理论作图时,切点或接点找得不准确、实际照片边缘线临摹的误差等。

参考文献:

- [1] 吕洪生,王志兵.关于几种异性平面装药爆轰波阵面的描述[J].爆炸与冲击,2004,24(4):312-318.
L ĨHong-sheng, WANG Zhi-bing. Description about detonation (wave) front of several kinds of anisotropic plane charges [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(4):312-318.

附录 A

关于 No.3 照片边缘线的作图

在本实验中,在装药的起爆处铺了一层各向同性炸药(RDX),因此在起爆点周围更可视作“理想的平铺导爆索加一层各向同性炸药”,于是可按文献[1]中情况C作图,作图结果为图A1。在该理论图中, \overline{AB} 取No.3边缘线的 x 向尺寸,即 $\overline{AB}=28\text{mm}$;而 \overline{EF} 根据(6)式和(7)式计算,并取 $D_0=D_2$ 。

将理论作图 Θ 与实际的图线 Λ_* 并列在一起(见图A2,其中(a)与图A1对应,(b)与图3(a)对应),可以看出理论作图与实际图线非常符合。所以在正文中,作为初始爆轰阵面的No.3照片的边缘线 Λ_* ,亦可按理论作图求得。

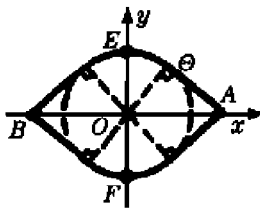


图 A1 按照纯理论作图绘制的 $t=12\mu\text{s}$ 时的爆轰波阵面

Fig. A1 Detonation front drawn on the basis of pure theoretical construction at $t=12\mu\text{s}$

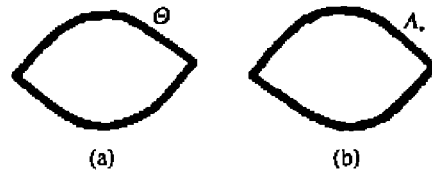


图 A2 理论爆轰波阵面与实际爆轰波阵面对比($t=12\mu\text{s}$)

Fig. A2 The theoretical detonation front compared with the real detonation front ($t=12\mu\text{s}$)

Photographs of detonation front of a kind of special plane charge and analysis for these results

L ĨHong-sheng^{1,2 *}, WANG Zhi-bing²

(1. Department of Applied Physics and Electronic Technology,
Changsha University, Changsha 410003, Hunan, China;

2. Institute of Natural Science, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: In this paper, high-speed photograph of detonation front has been conducted for a kind of plane charge composed of detonating fuses. And the photographed pictures have been compared with theoretical construction. The results proved the methods of the theoretical construction in this paper are correct.

Key words: mechanics of explosion; construction analysis; high-speed photograph; deformable front of detonation wave; special plane charge of explosive

* Corresponding author: L ĨHong-sheng
Telephone: 0731-4575269